



Cirad-Emvt
Programme
« Productions Animales »

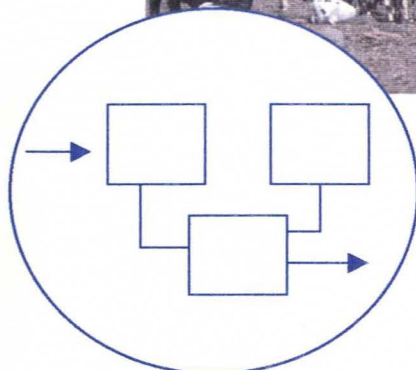
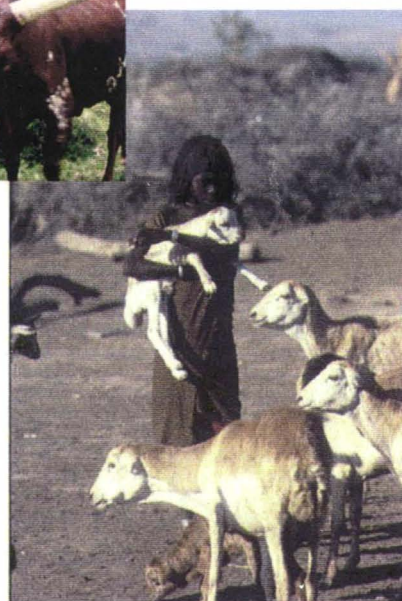


Institut National
Recherche Agronomique
Unités de Recherches
sur les Herbivores

DOUBLE

MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES TROUPEAUX

Edition scientifique : B. Faye (Cirad-Emvt)
et S. Ingrand (Inra-Theix)



Compte rendu du Séminaire INRA-CIRAD à Montpellier
Les 31 janvier et 1^{er} février 2001

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
Baillarguet

Interactions modélisation – expérimentation : Illustration à partir d'un modèle de croissance des bovins

Hoch T., Agabriel J.

*INRA, Centre de Clermont-Theix
Unité de Recherche sur les Herbivores – Equipe Système de Production
63122 SAINT-GENES-CHAMPANELLE*

Résumé

Le cycle de développement d'un modèle nécessite des aller-retour entre expérimentation et modélisation en plusieurs points. Plus particulièrement, les données sont nécessaires à la détermination des valeurs des paramètres et lors de la phase de validation du modèle. Par ailleurs, l'élaboration d'un modèle met en lumière des lacunes dans les connaissances, à combler par la mise en place d'expérimentations.

Ceci est illustré par la description de la modélisation de la croissance de bovins. Un modèle dynamique mécaniste a été élaboré, qui vise à simuler l'évolution de la composition corporelle en fonction d'apports nutritionnels variables. Les quantités de protéines et de lipides dans la carcasse et le 5^{ème} quartier représentent les variables d'état de ce modèle à compartiments. Ces variables évoluent sous l'influence de l'énergie métabolisable ingérée, par le biais de processus de synthèse et de dégradation.

Nous ne disposons pas de jeux de données regroupant énergie ingérée et mesures de composition corporelle pour des animaux en croissance discontinue. Dans ce but, une expérimentation a été mise en place à Marcenat (Cantal) afin d'étudier l'évolution de la composition corporelle de génisses Salers en croissance continue ou discontinue.

D'autres expérimentations peuvent viser à l'amélioration des connaissances pour un processus biologique précis. Il est ainsi question de mettre en place des dispositifs de mesure de la synthèse protéique.

La généralisation de ce modèle nécessitera toutefois une validation sur des données plus « globales », telles que le poids vif, et ce pour différents types d'animaux, à regrouper en fonction de leur format et de leur précocité.

Introduction

La figure 1 propose le schéma classique d'un cycle de développement des modèles. L'expérimentation peut intervenir en plusieurs points de ce cycle. Tout d'abord, elle participe à notre connaissance du système, elle-même à la base des hypothèses qualitatives régissant l'élaboration du modèle. L'expérimentation fournit des données utilisées d'une part pour la détermination des paramètres, d'autre part pour la validation du modèle. Ces deux étapes cruciales et complémentaires permettent de passer du modèle descriptif au modèle prédictif. Néanmoins, il est fréquent qu'une validation non satisfaisante entraîne la mise en route d'un nouveau cycle, avec la remise en cause de la structure du modèle ou (et) d'équations mathématiques. La modélisation constitue donc un processus itératif dans lequel les aller-retour avec l'expérimentation sont réguliers.

L'objet de ce texte est d'illustrer ces concepts et techniques à l'aide d'un exemple de modélisation de la croissance de bovins. Ce modèle a été élaboré dans le but de pouvoir simuler l'évolution de la composition corporelle en fonction d'apports énergétiques variables dans le temps. Il doit pouvoir s'appliquer à différents types de bovins, en fonction de leur race et de leur sexe.

Dans un premier temps, nous nous attacherons à décrire le modèle développé. Puis, nous verrons comment les données alimentent le processus de modélisation et en quoi ce dernier peut générer la mise en place d'expériences.

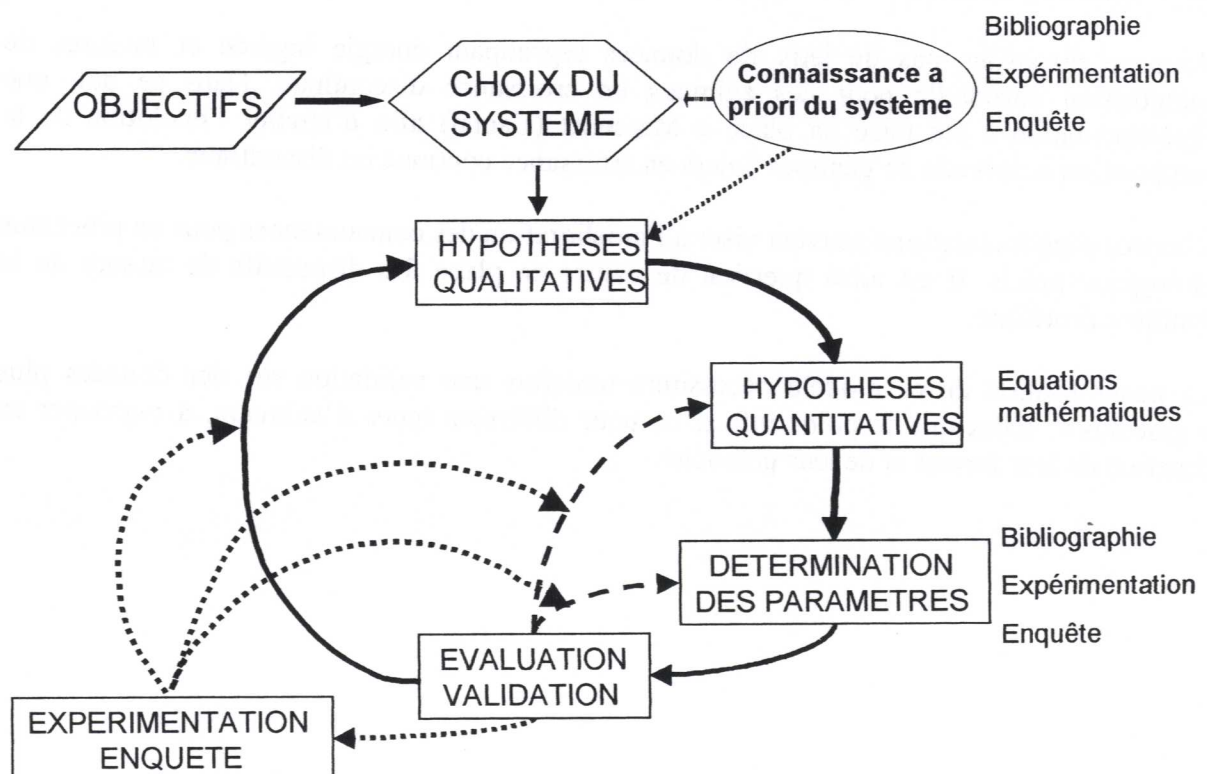


Figure 1 : Les différentes étapes de l'élaboration d'un modèle (d'après Sauvart, 2000)

Modèle

Caractérisation et analyse du système

Dans le but de modéliser l'évolution de la composition corporelle d'animaux au cours du temps en fonction de l'énergie ingérée, un modèle dynamique a été élaboré. Ce modèle mécaniste prend en compte en tant que variables d'état les principaux compartiments déterminant la composition chimique, à savoir les protéines et les lipides (figure 2). Ces deux constituants ont été distingués au sein de la carcasse et du 5^{ème} quartier, en raison d'un métabolisme énergétique plus actif du dernier, notamment dans les viscères. Distinguer carcasse et cinquième quartier s'avère également pertinent du point de vue des variables d'intérêt zootechnique que le modèle pourra simuler.

L'évolution de ces variables d'état s'effectue sous l'influence de l'énergie métabolisable ingérée. Dans un premier temps, la nature de l'énergie de la ration n'est pas prise en compte. De même, les effets de différents niveaux d'apport protéique feront l'objet d'un développement ultérieur du modèle.

La période de simulation se situe entre le sevrage et l'âge adulte.

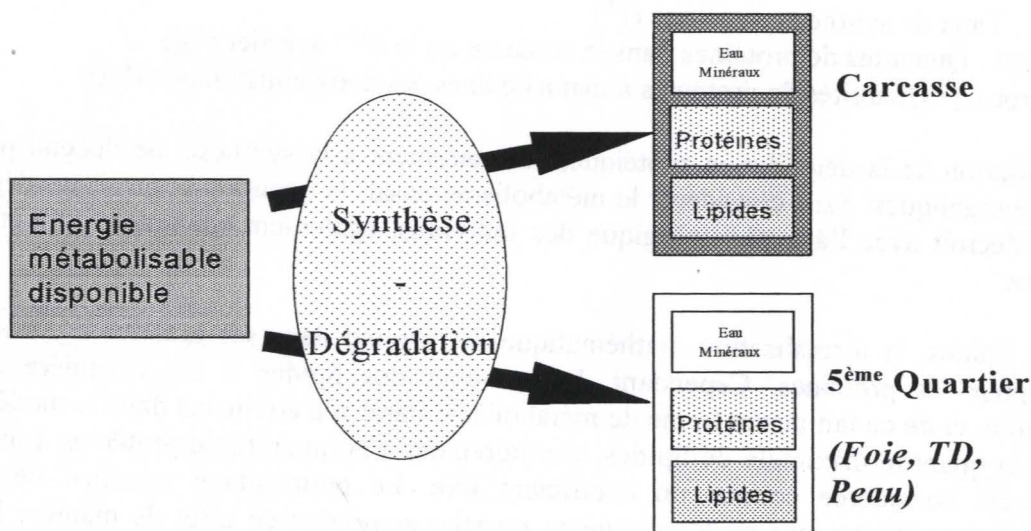


Figure 2 : Schéma conceptuel du modèle développé

Equations du modèle

L'évolution des différentes variables d'état s'effectuent suivant les mêmes processus de synthèse et de dégradation, d'où l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dX}{dt} = \text{Synthèse} - \text{Dégradation} \quad (1)$$

Toutefois, la formalisation mathématique de ces processus a été différenciée pour les protéines et les lipides.

En ce qui concerne les protéines, un métabolisme basal a été formalisé par une fonction dépendant linéairement de la quantité de protéines, appliquée à la synthèse et la dégradation.

A cette fonction a été ajouté pour la synthèse un terme dépendant de l'énergie ingérée par le biais d'une fonction de Michaelis-Menten :

$$\text{Synthese} = \text{SynMax} \cdot \frac{\text{EM}_i}{C + \text{EM}_i} + \text{SynMetBas} \quad (2)$$

- EM_i : Energie Métabolisable ingérée ($\text{MJ} \cdot \text{j}^{-1}$)
- C : Coefficient de demi-saturation de l'équation de Michaelis-Menten ($\text{MJ} \cdot \text{j}^{-1}$)
- SynMax : Taux de synthèse maximal (j^{-1})
- SynMetBas : Synthèse liée au Métabolisme Basal (j^{-1})

Le taux de synthèse maximal est considéré comme variant suivant une fonction de Gompertz, donc dépendant de l'âge physiologique des animaux. Cet âge s'exprime comme le rapport entre la quantité de protéines présentes et la quantité maximale. Soit :

$$\text{SynMax} = \alpha \cdot \text{Prot} \cdot \ln \left(\frac{\text{Prot}_{\text{Max}}}{\text{Prot}} \right) \quad (3)$$

α : Taux de synthèse protéique (j^{-1})

Prot : Quantités de protéines dans la carcasse ou le 5^{ème} quartier (kg)

Prot_{Max} : Quantités de protéines à maturité dans ces deux constituants (kg)

La formulation de la dégradation protéique, contrairement à la synthèse, ne dépend pas des apports énergétiques. Sans considérer le métabolisme basal, la quantité de protéines dégradée par jour décroît avec l'âge physiologique des individus, également suivant une fonction de Gompertz.

Pour les lipides, la formalisation mathématique correspond dans ses grandes lignes à celle décrite pour les protéines. Cependant, le turn-over des lipides a été considéré comme négligeable, et de ce fait aucun terme de métabolisme basal n'a été inclus dans le modèle. Par ailleurs, la quantité maximale de lipides, contrairement à la quantité de protéines à maturité, n'a pas été considérée comme un coefficient fixe. Le pourcentage maximal de lipides ($\% \text{Lip}_{\text{Max}}$) dans la carcasse ou le cinquième quartier augmente en effet de manière linéaire avec l'âge physiologique des animaux :

$$\% \text{Lip}_{\text{max}} = \% \text{Lip}_0 + \% \text{Lip}_c \cdot \left(\frac{\text{Prot}}{\text{Prot}_{\text{max}}} \right) \quad (4)$$

$\% \text{Lip}_0$ et $\% \text{Lip}_c$ sont des coefficients définissant la concentration lipidique maximale en fonction de l'âge physiologique.

De plus, la dégradation lipidique ($\text{Deg}(\text{Lip})$) a été formulée différemment de celle des protéines. Elle dépend en effet directement de l'état du compartiment, avec toutefois l'impossibilité de passer sous un seuil minimal de concentration (Lip_{min}), correspondant aux lipides de structure :

$$\text{Deg}(\text{Lip}) = \beta \cdot (\text{Lip} - \text{Lip}_{\min}) \quad (5)$$

α : Taux de dégradation lipidique (j^{-1})

Lip : Quantité de lipides dans la carcasse ou le 5^{ème} quartier

La forme des équations est identique pour représenter les évolutions dans la carcasse et le 5^{ème} quartier. Seule la valeur des paramètres les différencie et représente des métabolismes différents.

Le Poids Vif Vide (PVV) est calculé en ajoutant les quantités de lipides (carcasse et 5^{ème} quartier) à la masse délipidée (Mdel). Cette dernière se déduit de la quantité de protéines par une relation d'allométrie (Geay *et al.*, 1987) :

$$\text{Mdel} = b_0 \cdot \text{Prot}^{b_1} \quad (6)$$

Le Poids Vif (PV) et le PVV sont liés par une relation du même type (Robelin & Daenicke, 1980) :

$$\text{PV} = c_0 \cdot (\text{PVV})^{c_1} \quad (7)$$

Cette équation relie de manière empirique le contenu digestif au développement de l'animal et de son appareil digestif. L'estimation des quantités réellement ingérées permettrait d'améliorer le modèle.

Dans le cas où une période de ré-alimentation succède à une phase de restriction, une compensation s'effectue. Parmi les phénomènes invoqués pour expliquer cette croissance compensatrice figurent l'augmentation de l'ingestion, un gain plus riche en protéines et de plus faibles dépenses d'entretien en fin de restriction. Afin de tenir compte de ce dernier processus, la dégradation protéique simulée en début de ré-alimentation est inférieure à une valeur théorique ne prenant pas en compte la compensation. Passé un délai, les deux valeurs se rejoignent.

De même, il est fréquent d'observer une diminution du PV en début de ré-alimentation, liée à une meilleure digestibilité des aliments. Une diminution du contenu digestif a par conséquent été incluse dans le modèle pour exprimer l'adaptation à ce nouveau régime.

Calibration et validation

Dans un premier temps, la détermination des paramètres (identification) s'est effectuée sur des jeux de données recueillis dans la littérature ou issus d'expériences antérieures menées à Theix. La difficulté principale est de regrouper des mesures de la composition corporelle (à défaut de composition tissulaire, voire de poids) et les niveaux d'énergie ingérée correspondants.

Ainsi, nous avons dans un premier temps ajusté le modèle à l'aide de données provenant de la thèse de Robelin (1986), concernant notamment des taurillons Charolais en croissance continue. Ce jeu de données nous intéressait particulièrement car il différenciait protéines et lipides au sein de la carcasse et du cinquième quartier. L'ajustement, par exemple sur les quantités de protéines (figure 3), montre que le modèle est capable de représenter correctement l'évolution des variables d'état, ce qui souligne la pertinence des hypothèses

sous-jacentes, tout au moins dans le cas d'une croissance continue. Une validation interne a été réalisée en calculant les évolutions des taux de synthèse et de dégradation protéique, qui se sont avérées réalistes par rapport aux données de la littérature.

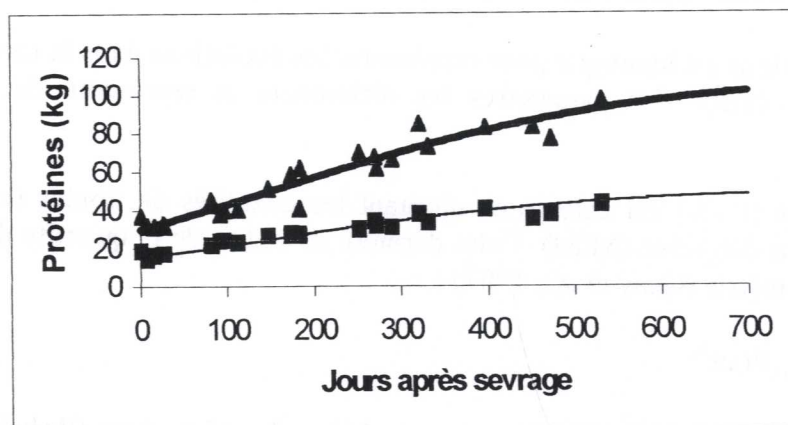


Figure 3 : Ajustement du modèle à partir des quantités de protéines dans la carcasse (trait épais et ▲) ou le cinquième quartier (trait fin et ■).

Les données de Saubidet & Verde (1976) ont été utilisées afin de valider le modèle. Il s'agit de données de poids vif de bœufs Angus conduits soit de manière discontinue (ajustement du modèle) soit continue (validation) (figure 4). L'ajustement s'effectue à partir des animaux en croissance discontinue car ce cas apparaît plus informatif.

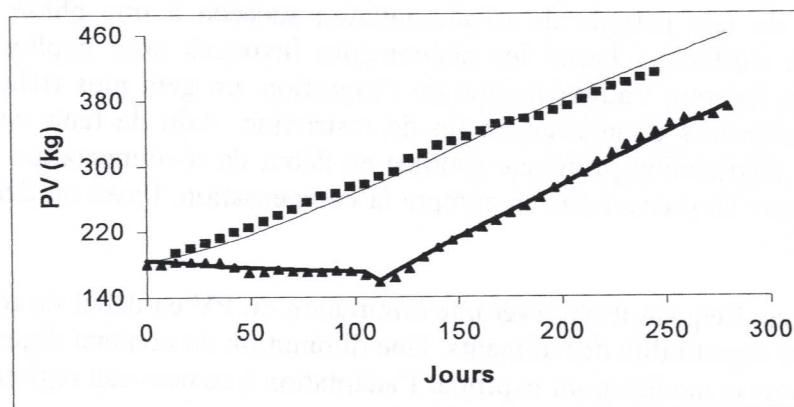


Figure 4 : Calibration du modèle sur des données de croissance discontinue (trait épais et ▲) et validation pour des croissances continues (trait fin et ■).

Cette dernière confrontation montre une bonne concordance entre le modèle et les données, à ceci près qu'il s'agit de données de poids vif pour des animaux regroupés par lot. Ceci nous a amené à mettre en place des expériences sur le suivi de la composition corporelle au cours du temps.

Expérimentation associée

Une expérimentation a été mise en place au domaine Inra de Marcenat (Cantal) afin de mesurer l'évolution de la composition corporelle de génisses de race Salers durant deux années. Après le sevrage, les animaux ont été séparés en deux lots, l'un conduit de manière discontinue, l'autre de manière continue. De la même façon que précédemment, l'identification des paramètres s'effectuera avec les données de croissance discontinue tandis

que le modèle sera validé à l'aide des données de croissance continue. En parallèle à l'estimation de la composition corporelle au cours du temps, les quantités d'énergie ingérée sont mesurées individuellement.

Les mesures de la composition corporelle sont de deux ordres :

- mesures directes après abattage d'animaux témoin par âge,
- mesures indirectes : taille des adipocytes, espace de diffusion de l'eau lourde. Les mesures indirectes concernent aussi des animaux abattus, ce qui permettra d'ajuster ces mesures sur les abattages.

Ces mesures jalonnent les grandes périodes de la vie des génisses et sont effectuées préférentiellement à la rentrée à l'étable et avant la sortie à l'herbe. Du point de vue des abattages, nous privilégions le lot conduit de manière discontinue, car nous avons pensé que la détermination des paramètres nécessiterait plus de données. En période estivale, un foin ventilé de très bonne qualité est distribué de façon à assurer la compensation tout en contrôlant l'alimentation.

L'objectif premier de cette expérimentation associée au modèle est de fournir un jeu de données complet concernant des génisses, pour partie en croissance discontinue. Suivant les résultats de la validation du modèle, la formalisation des processus, notamment la croissance compensatrice, pourra éventuellement être remise en cause.

POIDS

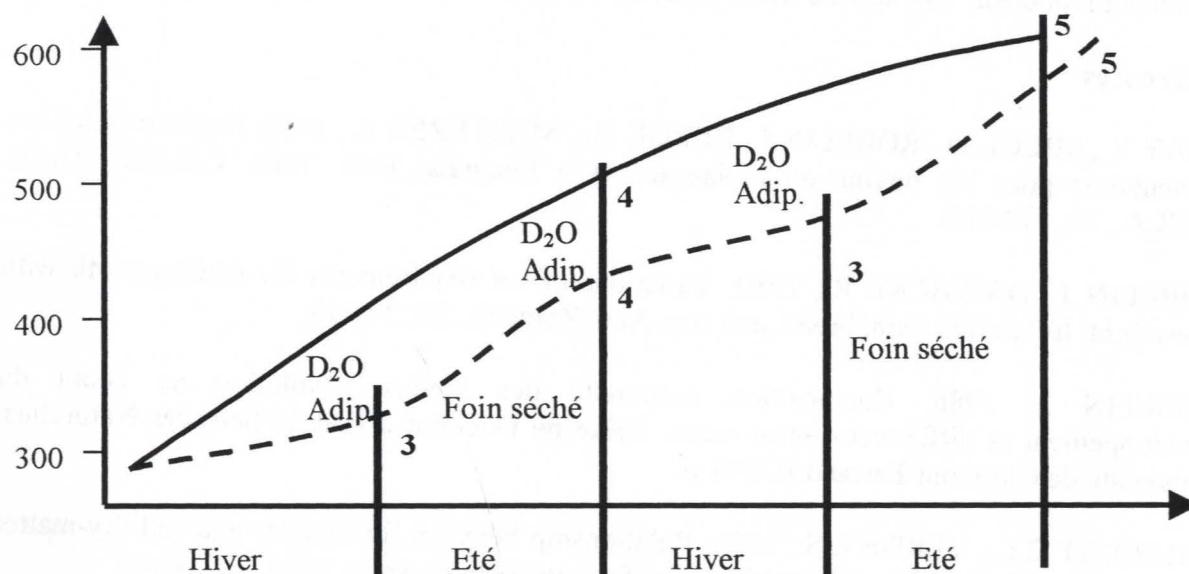


Figure 5 : Schéma des expériences engagées à Marcenat sur 24 génisses Salers.

D2O : mesure de l'espace de diffusion de l'eau lourde

Adip. : mesure de la taille des adipocytes

3 : nombre d'abattages à cette période

Discussion et perspectives

En appui à ce projet de modélisation, les expériences en cours fourniront donc des données concernant l'évolution de la composition corporelle de génisses, dont une partie sera conduite en croissance discontinue. Ce type d'expérimentation permet par conséquent de pallier

l'insuffisance de données issues de la bibliographie, voire de manques dans nos connaissances et notre expertise. A partir de ces expériences, nous pourrions réaliser calibration et validation sur des jeux de données distincts.

La modélisation peut cependant faire apparaître des besoins plus analytiques. A titre d'exemple, l'analyse de la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres a montré l'influence d'une part de la quantité de protéines à maturité, d'autre part du taux de synthèse protéique. Afin de déterminer plus précisément ce dernier paramètre, il est envisagé de mesurer l'évolution de la synthèse protéique en fonction du rythme de croissance, en collaboration avec des chercheurs de l'INRA de Theix travaillant sur le métabolisme protéique. L'expérimentation se focaliserait alors sur un processus, voire un paramètre particulier.

Dans tous les cas, la confrontation du modèle avec les données issues de l'expérimentation peut entraîner l'invalidation du modèle en l'état. Il s'agit alors de répéter le cycle de développement du modèle, en intégrant de nouveaux processus ou en formulant différemment des processus existants. Au-delà de la validation du modèle pour un type d'animal se pose la question de la généralisation du modèle à des types d'animaux aussi variés que possible. Une autre forme de validation devra être effectuée, à partir de données issues de situations moins contrôlées que celles décrites ici. En effet, il sera impossible de disposer dans chaque cas de variables de composition corporelle en parallèle avec des données d'énergie ingérée. Sans doute serons-nous obligés d'utiliser des données de poids pour la validation, voire de regrouper les différents types d'animaux en fonction de leur précocité. Ce regroupement, forcément réducteur, fera appel à notre expertise en la matière.

Références

GEAY Y., MICOL D., ROBELIN J., BERGE Ph., MALTERRE C., 1987. Recommandations alimentaires pour les bovins en croissance et à l'engrais. Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix, I.N.R.A., 70, 173-183.

ROBELIN J., DAENICKE R., 1980. Variations of net requirements for cattle growth with liveweight, liveweight gain, breed, and sex. Ann. Zootech., 29, 99-118.

ROBELIN J., 1986. Composition corporelle des bovins : évolution au cours du développement et différences entre races. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Clermont-Ferrand II. 391 p.

SAUBIDET C.L., VERDE L.S., 1976. Relationship between liveweight, age and dry-matter intake for beef cattle after different levels of food restriction. Anim. Prod., 22, 61-69.

SAUVANT D., 2000. Ecole Chercheur « Modélisation de la croissance ». Paris, 12-14 avril 2000.